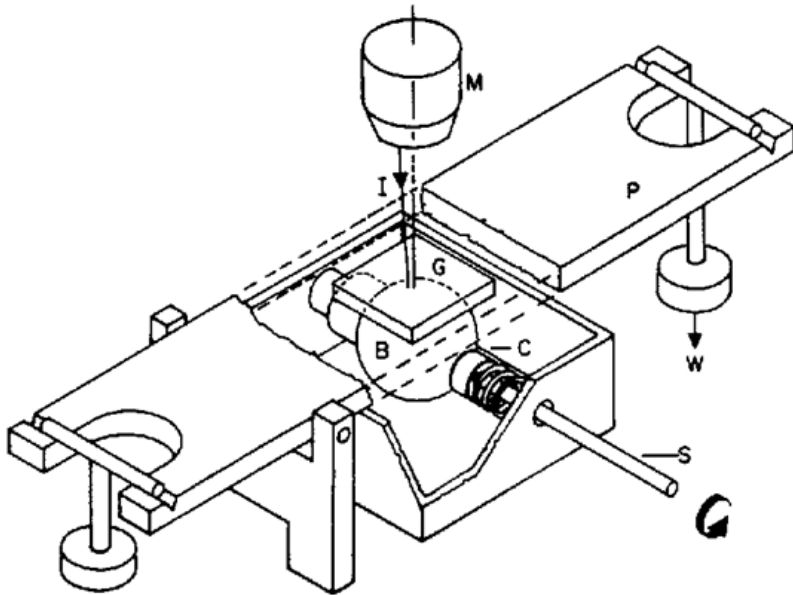


**Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně**  
**Ústav konstruování**

**KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ**  
**strojní součásti**

**Přednáška 4**

# Tření, mazání, opotřebení



A. Cameron - R. Gohar; Proc. Roy. Soc. 1966

*... mezi všemi těmi, kteří se zabývali  
problémem pohybujících se sil, není  
nikdo, kdo věnoval dostatečnou  
pozornost tření ve strojích ...  
GUILAUME AMONTONS*

# Obsah

## **Tření, mazání a opotřebení**

- Tribologie.
- Povrchy strojních součástí.
- Teorie tření pro kovy.
- Základní druhy opotřebení.
- Maziva a mazání.
- Viskozita.
- Režimy mazání.
- Parametr mazání.
- Mezné mazání.
- Elastohydrodynamické mazání.
- Hydrodynamické mazání.

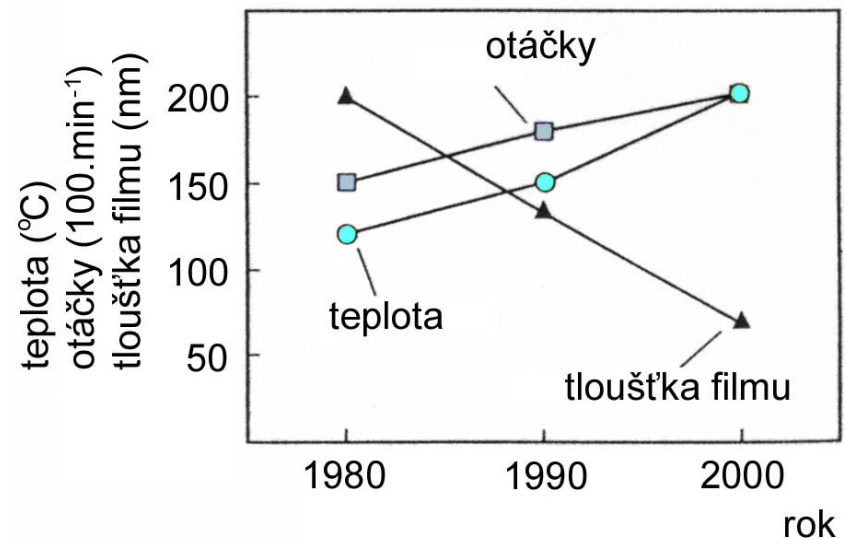
# Tribologie

**Tribologie** je věda a technologie zabývající se vzájemným působením povrchů při jejich relativním pohybu a s tím spojená praxe. Vzájemná interakce povrchů je doprovázena **třením**, jehož důsledkem je **opotřebení**. Tření a opotřebení je možné zmenšit **mazáním**, jehož úlohou je prostřednictvím maziva zabránit bezprostřednímu styku povrchů.

## Odhad ročních úspor v hospodářství SRN v důsledku aplikace tribologie

sektor	úspory (v mld. DM)
energetika	0,239
průmysl	0,298
doprava (maz.)	2,395
doprava	3,466
celkem	6,398

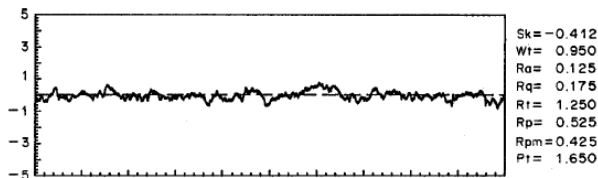
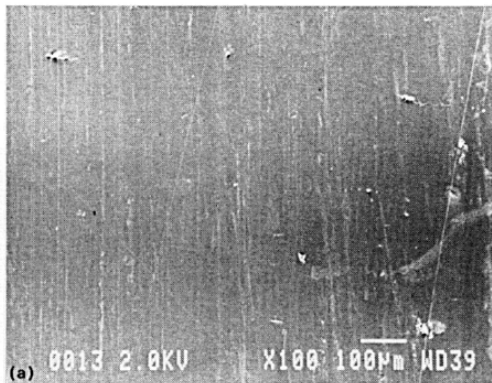
## Vývoj tloušťky mazacího filmu u ložisek automobilových alternátorů



# Povrchy strojních součástí

Povrchy strojních součástí nejsou hladké, nýbrž vykazují **nedokonalosti** a **strukturu** způsobenou opracováním. Působením mechanických vlivů podléhají elastickým a plastickým **deformacím**. V důsledku fyzikálních a chemických vlivů na nich probíhá **adsorpce** a **chemické reakce**.

Broušený povrch



Průměrná aritmetická úchylka profilu (cla)

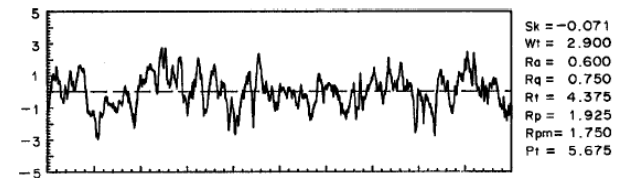
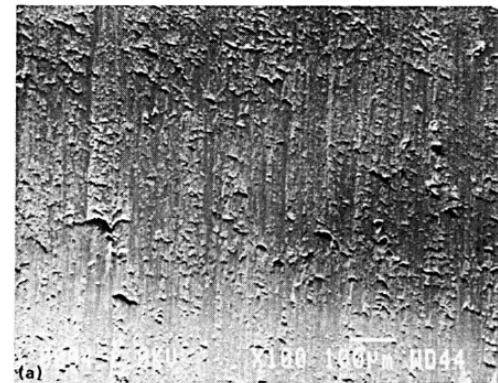
$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i|$$

Průměrná kvadratická úchylka profilu (rms)

$$Rq = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2 \right)^{1/2}$$

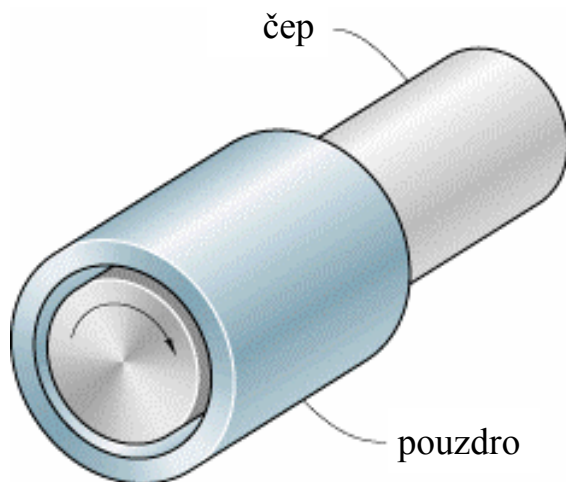
$$\frac{Rq}{Ra} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,1$$

Frézovaný povrch

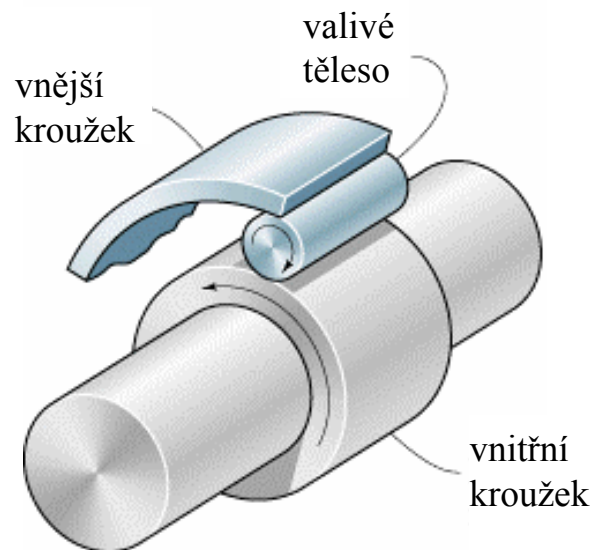


# Konformní a nekonformní povrchy

**Konformní povrchy** do sebe zapadají s velkou geometrickou přesností, takže jejich zatížení je přenášeno po relativně velké ploše. Zatížení bývají poměrně malá a nezpůsobují podstatné zvětšování kontaktní plochy. Typickým příkladem jsou kluzná ložiska.



**Nekonformní povrchy** se stýkají ve velmi malé ploše, která je až o tři řády menší než v případě konformních povrchů. Přenášená zatížení bývají relativně velká a se zvětšováním zatížení roste i kontaktní plocha. Příkladem jsou valivá ložiska a ozubené převody.

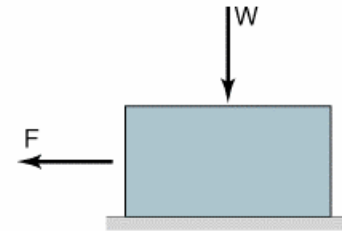


# Tření

**Tření** je pasivní odpor působící proti relativnímu pohybu těles nacházejících se ve vzájemném kontaktu. Podle druhu relativního pohybu a tvaru třecích ploch se tření dělí na tření **smykové** a **valivé**.

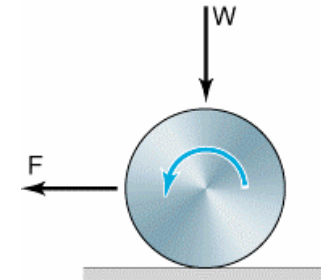
**součinitel smykového tření**

$$\mu = \frac{F}{W}$$



**součinitel valivého tření**

$$\mu_r = \frac{F}{W} r$$



## Nízké tření

ložiska, ozubené převody,  
vačky

## Vysoké tření

brzdy, řemenové převody,  
pohyb po cestách

## Zákony suchého tření

1. Třecí síla je přímo úměrná normálovému zatížení.
2. Třecí síla nezávisí na velikosti zdánlivé stykové plochy těles (tj. není závislá na tvaru a velikosti těles).
3. Třecí síla nezávisí na kluzné rychlosti.

# Teorie smykového tření pro kovy

Reálná tělesa nejsou hladká a jejich vzájemný styk se děje po výčnělcích. V důsledku toho je skutečná styková plocha velmi malá a lokální tlaky na vrcholcích povrchových nerovností natolik velké, aby způsobily jejich elastické nebo plastické deformace.

## Bowden - Taborova teorie smykového tření

Třecí síla je rovna síle nutné k porušení adhezních spojů (mikrosvarů)

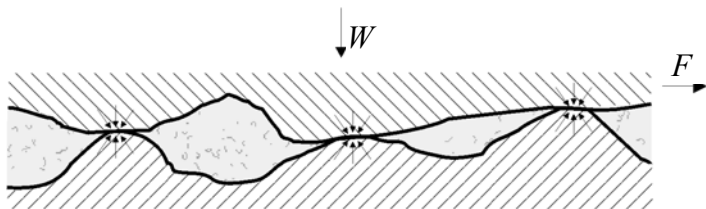
$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{A_r \tau}{A_r p} = \frac{\tau}{p} \quad \mu = \frac{0,5R_e}{3R_e} = \frac{1}{6}$$

$A_r$  skutečná styková plocha

$\tau$  smykové napětí v adhezních spojkách

$p$  průměrný stykový tlak

pro kovy platí:  $\tau \approx 0,5R_e$  a  $p = H \approx 3R_e$



## Deformační teorie smykového tření

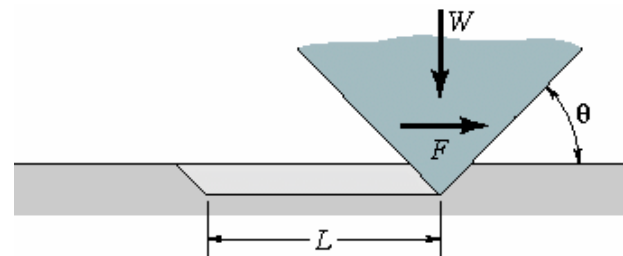
Třecí síla je rovna síle potřebné k deformaci rytím tvrdého hrotu v měkkém povrchu

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{A_0 H}{AH} = \frac{2}{\pi} \tan \Theta$$

$A_0$  plocha kolmo ke směru pohybu

$A$  styková plocha

$H$  vniková tvrdost





# Součinitelé smykového tření pro vybrané materiály

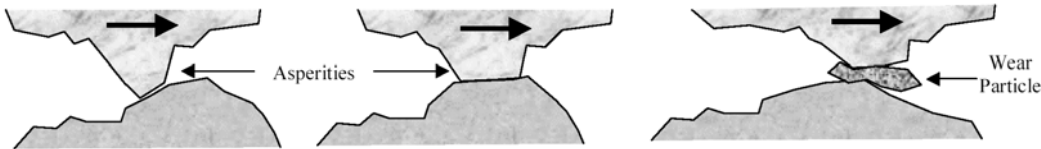
Coefficients of Friction for Some Material Combinations					
Material 1	Material 2	Static		Dynamic	
		Dry	Lubricated	Dry	Lubricated
mild steel	mild steel	0.74		0.57	0.09
mild steel	cast iron		0.183	0.23	0.133
mild steel	aluminum	0.61		0.47	
mild steel	brass	0.51		0.44	
hard steel	hard steel	0.78	0.11–0.23	0.42	0.03–0.19
hard steel	babbitt	0.42–0.70	0.08–0.25	0.34	0.06–0.16
Teflon	Teflon	0.04			0.04
steel	Teflon	0.04			0.04
cast iron	cast iron	1.10		0.15	0.07
cast iron	bronze			0.22	0.077
aluminum	aluminum	1.05		1.4	

Source: *Mark's Mechanical Engineers' Handbook*, T. Baumeister, ed., McGraw-Hill, New York.

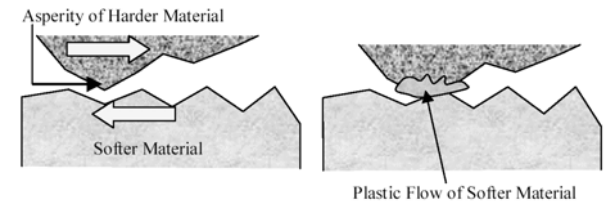
# Opotřebení

**Opotřebení (wear)** je degradační proces vedoucí k progresivnímu úbytku materiálu z interagujících povrchů. Opotřebení je důsledkem zatížení a relativního pohybu povrchů. Podle fyzikální podstaty se rozlišují tyto základní formy opotřebení: **adhezní, abrazní, erozní, únavové a korozní.**

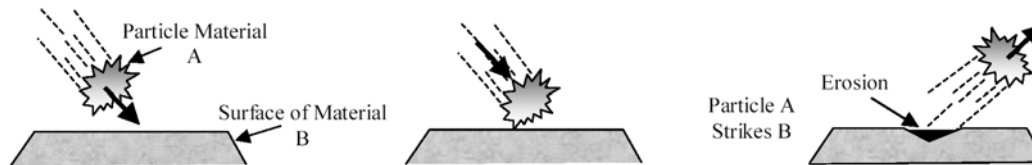
## adhezní opotřebení



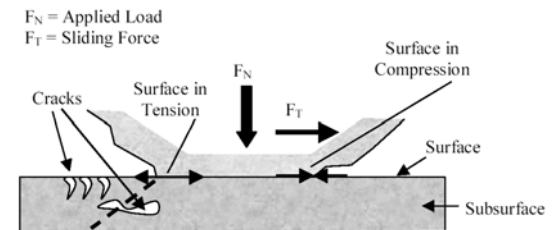
## abrazní opotřebení



## erozní opotřebení

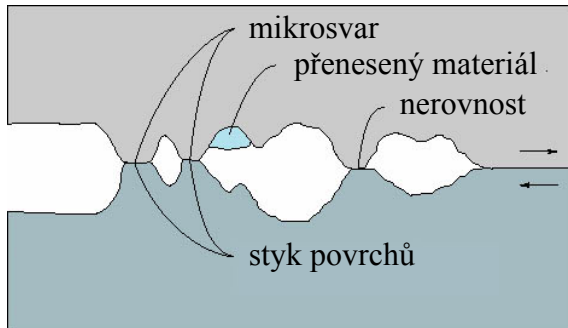


## únavové opotřebení



# Adhezní opotřebení

K adheznímu opotřebení dochází při bezprostředním styku kovu s kovem. Jeho podstatou je tvorba **mikrosvarů** mezi vrcholky nerovností obou povrchů a jejich následné porušování, při kterém dochází k vytrhávání částic materiálu z povrchů. Adhezní opotřebení je nejčastější formou opotřebení.



Velikost objemového otěru  $V$  měkčího z obou materiálů je přímo úměrná zatížení  $W$  a kluzné dráze  $L$  a nepřímo úměrná vnikové tvrdosti materiálu  $H$ .

$$V = k_1 \frac{WL}{3H}$$

$k_1$  je bezrozměrný součinitel opotřebení, který vyjadřuje pravděpodobnost interakce mezi povrchovými nerovnostmi

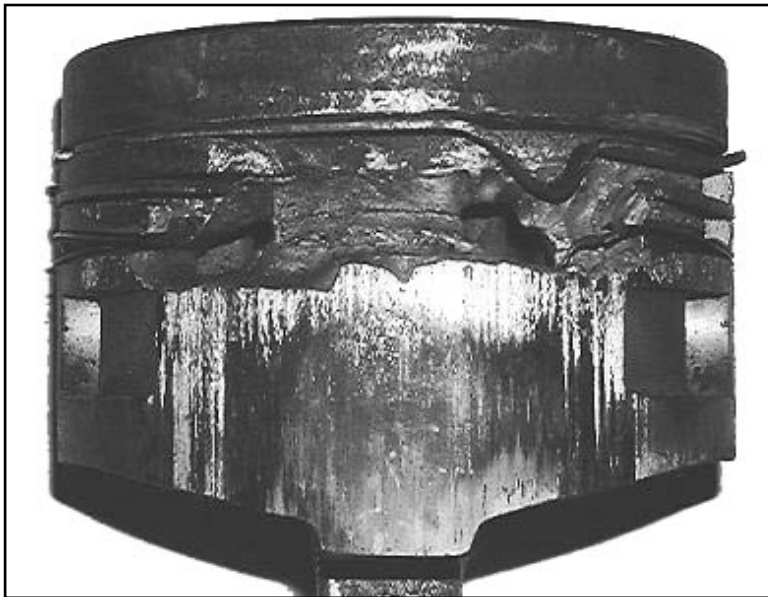
## hodnoty součinitele opotřebení

Rubbing Materials	Coefficient of friction, $\mu$	Adhesive wear constant, $k_1$
Gold on gold	2.5	0.1-1
Copper on copper	1.2	0.01-0.1
Mild steel on mild steel	0.6	$10^{-2}$
Brass on hard steel	0.3	$10^{-3}$
Lead on steel	0.2	$2 \times 10^{-5}$
Polytetrafluoroethylene on steel	0.2	$2 \times 10^{-5}$
Stainless steel on hard steel	0.5	$2 \times 10^{-5}$
Tungsten carbide on tungsten carbide	0.35	$10^{-6}$
Polyethylene on steel	0.3	$10^{-8}$ - $10^{-7}$

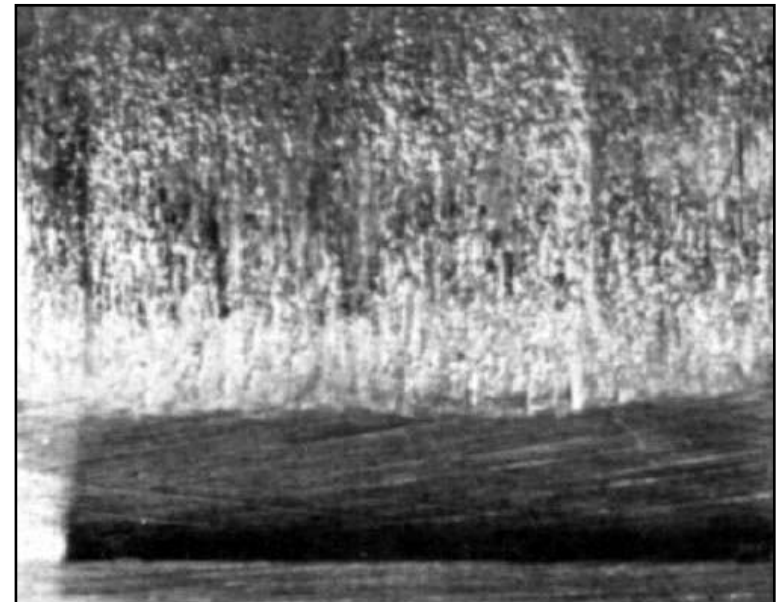
# Projevy adhezního opotřebení

Poškození způsobené adhezním opotřebením při kterém dochází k přenosu materiálu mezi povrchy a které se projevuje jejich poškrábáním se nazývá **rýhování (scoring)**. **Zadírání (scuffing)** představuje střední stupeň adhezního opotřebení, zatímco při **odírání (galling)** dochází k hrubému poškození povrchů. Je-li počet mikrosvarů natolik velký, že zabraňuje vzájemnému pohybu povrchů nastává **zadření (seizure)**.

**Píst motoru poškozený zadíráním**



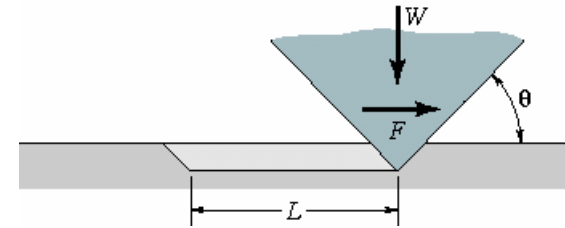
**Poškození boku zubu zadíráním**



# Abrzní opotřebení

Při abrazním opotřebení dochází k oddělování částic materiálu z povrchu tělesa účinkem tvrdšího povrchu jiného tělesa nebo účinkem abrazivních částic. K jeho tvorbě dochází **plastickou deformací nerovností** měkčích povrchů způsobenou tlakem nerovností tvrdších povrchů nebo tvrdých volných částic. Jedná se např. o opotřebení součástek při těžbě zeminy nebo o vniknutí nečistot do pohyblivých uložení.

$$V \approx \frac{2k_1}{\pi} \frac{\tan \Theta}{H} WL = \frac{k_1 k_2 WL}{H} \quad k_2 = \frac{2 \tan \Theta}{\pi}$$



$V$  objemový otěr

$k_1$  součinitel adhezního opotřebení

$k_2$  součinitel abrazního opotřebení

$\Theta$  vrcholový úhel nerovnosti

$H$  vniková tvrdost

$W$  normálové zatížení

$L$  kluzná dráha

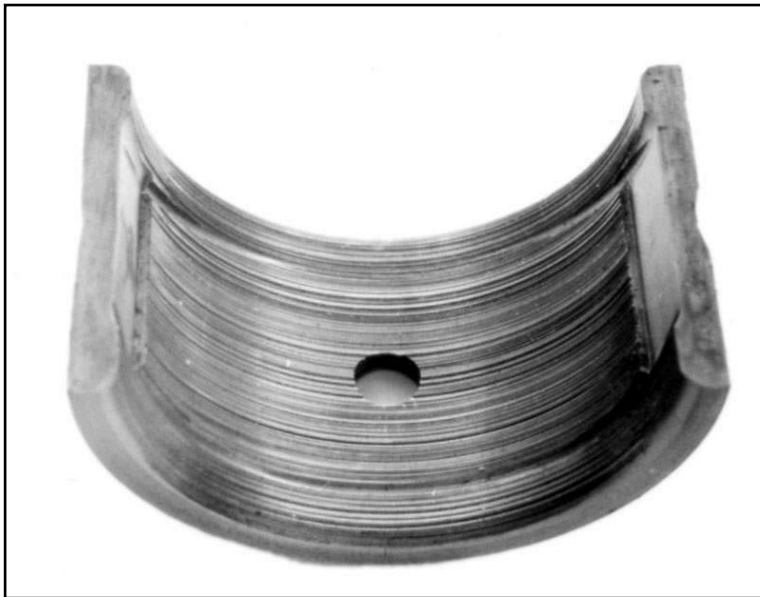
## Zákony opotřebení

1. Velikost opotřebení se zvyšuje s nárůstem kluzné dráhy.
2. Velikost opotřebení se zvyšuje se zatížením.
3. Velikost opotřebení se snižuje se zvyšující se tvrdostí povrchu těles.

# Projevy abrazního opotřebení

Abrazní opotřebení způsobené ostrými výčnělky nerovností tvrdšího povrchu nebo tvrdými částicemi se označuje jako **rýhování (scoring)**. Rýhování je charakterizováno krátkými ryskami nebo vtisky na kontaktních plochách orientovaných ve směru valení. Mezi abrazní opotřebení patří také **hlazení (polishing)**, ke kterému může docházet při záběhu součástí.

**Rýhování bronzového pouzdra ložiska**

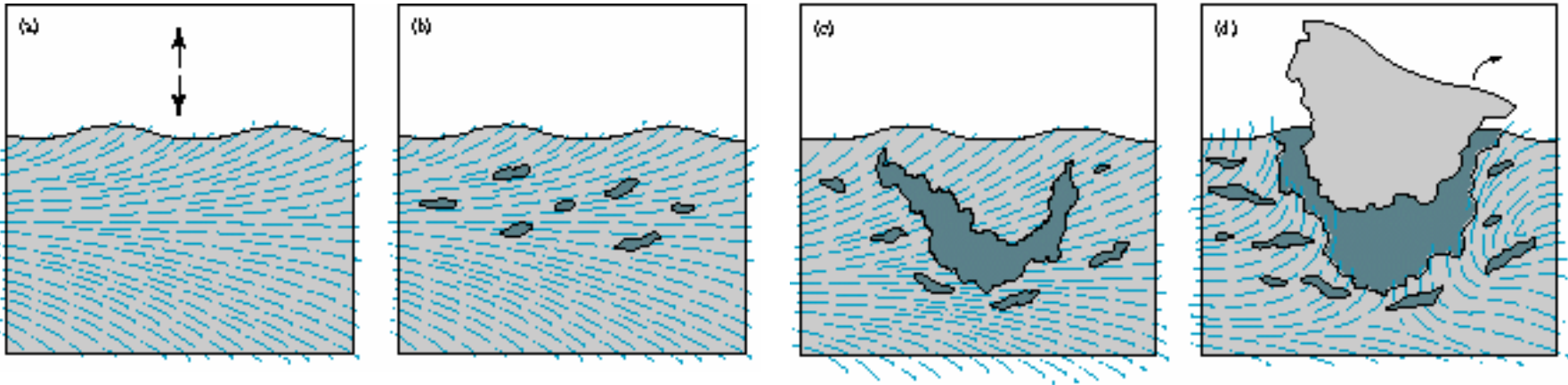


**Abrazní opotřebení boku zubu**



# Únavové opotřebení

Únavové opotřebení je převažující formou opotřebení u nekonformních povrchů. Projevuje se **pittingem** neboli vydrolováním materiálu provázeném vznikem důlků s charakteristickým lasturovým lomem. Únavové opotřebení je způsobeno šířením podpovrchových trhlin, které vznikají v důsledku cyklického namáhání povrchu. Vzniklé trhliny se větví, rozšiřují přednostně po hranicích zrn a tvoří dutiny, jejichž splývání vede k trhlinám rovnoběžným s povrchem. Jakmile dojde k vytvoření rozvětvené sítě trhlin, dochází k odlupování materiálu a k tvorbě důlků.



# Maziva a mazání

**Mazání** je proces při kterém se prostřednictvím maziva významně snižuje tření a opotřebením třecích povrchů nacházejících se v relativním pohybu. Jako **maziva** může být použito libovolné látky v plynném, kapalném nebo pevném skupenství, jejíž primární úlohou je separace a ochrana třecích povrchů. Mezi sekundární úlohy maziva pak může patřit např. zajištění odvodu tepla, odstraňování částic vznikajících opotřebením nebo dosažení některých požadovaných vlastností (např. korozivzdornosti).

## Kapalná maziva

- **Ropné oleje** jsou převážně uhlovodíkové. Získávají se z ropy destilací, rafinací nebo odpařováním.
- **Syntetické oleje** se zpravidla používají v případech, kdy nevyhovují ropné oleje, např. při nízkých nebo vysokých teplotách.
- **Vodní roztoky a emulze** se používají k mazání např. keramických povrchů.

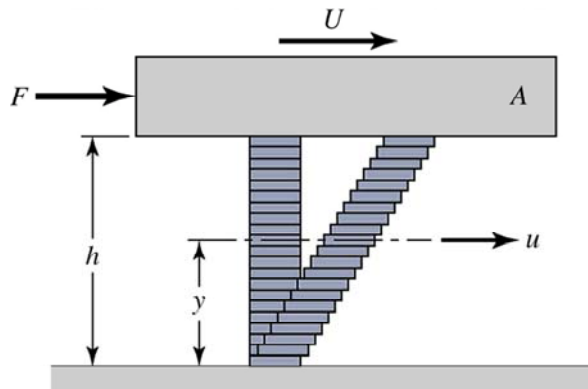
**Plastická maziva** se skládají z kapalné fáze, kterou tvoří olej a z tuhých částic disperzní látky (zpevňovadla). Mohou obsahovat také přídavné anorganické látky, např.  $\text{MoS}_2$ .

**Tuhá maziva** jsou dvojího typu: maziva s nízkou smykovou pevností např. grafit nebo  $\text{MoS}_2$  a vrstvy sulfidů či oxidů chemicky nebo elektrochemicky deponované na povrch součástí.



# Viskozita

Viskozita je jednou z nejdůležitějších vlastností tekutých maziv, která se projevuje odporem při pohybu jejich částic. Podle Newtona platí pro pohyb tekutiny s laminárním tokem, že smykové napětí  $\tau$  v rovině rovnoběžné s laminárním tokem, je přímo úměrné gradientu rychlosti  $du/dy$  neboli smykovému spádu  $D$ . Konstanta úměrnosti  $\eta$  se nazývá **absolutní (dynamická) viskozita**. Často se používá také **kinematická viskozita**  $\eta_k$  definovaná jako poměr absolutní viskozity a hustoty při dané teplotě.



$$\tau = \eta \frac{du}{dy} = \eta D$$

$$\eta_k = \frac{\eta}{\rho}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} = \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa}\cdot\text{s}$$

$$\eta_k = \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

## Jednotky absolutní viskozity

SI soustava N·s/m<sup>2</sup>

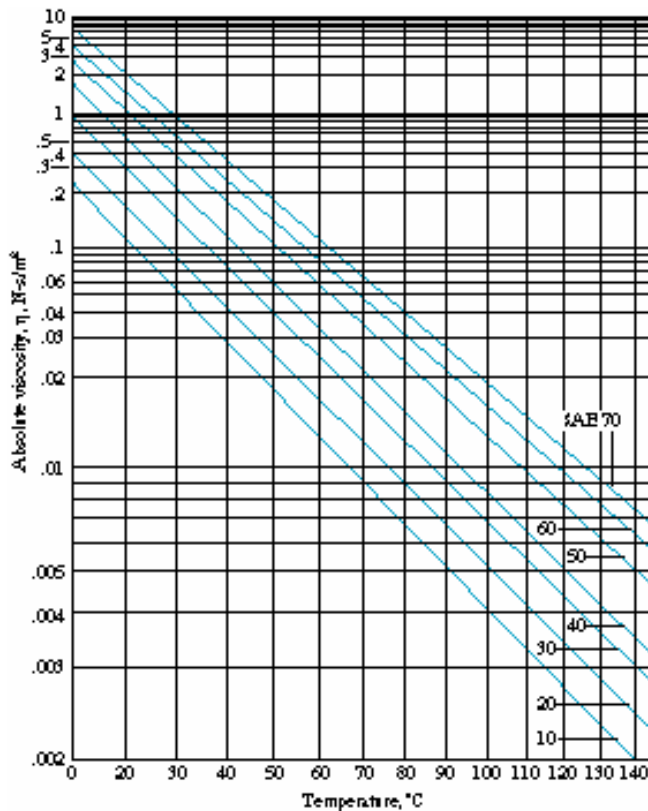
CGS soustava centipoise (cP)

Anglické reyn (lbf·s/in<sup>2</sup>)

To convert from	To			
	cP	kgf-s/m <sup>2</sup>	N-s/m <sup>2</sup>	lbf-s/in <sup>2</sup>
	<b>Multiply by</b>			
cP	1	1.02 x 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	1.45 x 10 <sup>-7</sup>
kgf-s/m <sup>2</sup>	9.807 x 10 <sup>3</sup>	1	9.807	1.422 x 10 <sup>-3</sup>
N-s/m <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	1.02 x 10 <sup>-1</sup>	1	1.45 x 10 <sup>-4</sup>
lbf-s/in <sup>2</sup>	6.9 x 10 <sup>6</sup>	7.03 x 10 <sup>2</sup>	6.9 x 10 <sup>3</sup>	1

# Změna viskozity s teplotou a tlakem

Viskozita minerálních a syntetických olejů klesá se vzrůstající teplotou. Proto každá hodnota viskozity musí být doprovázena teplotou, při které byla měřena.



Viskozita kapalných a plastických maziv s tlakem vzrůstá. Velikost změny závisí na chemickém složení kapaliny. Závislost viskozity kapalin na tlaku se vyjadřuje exponenciálním (Barusovým) vztahem.

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p),$$

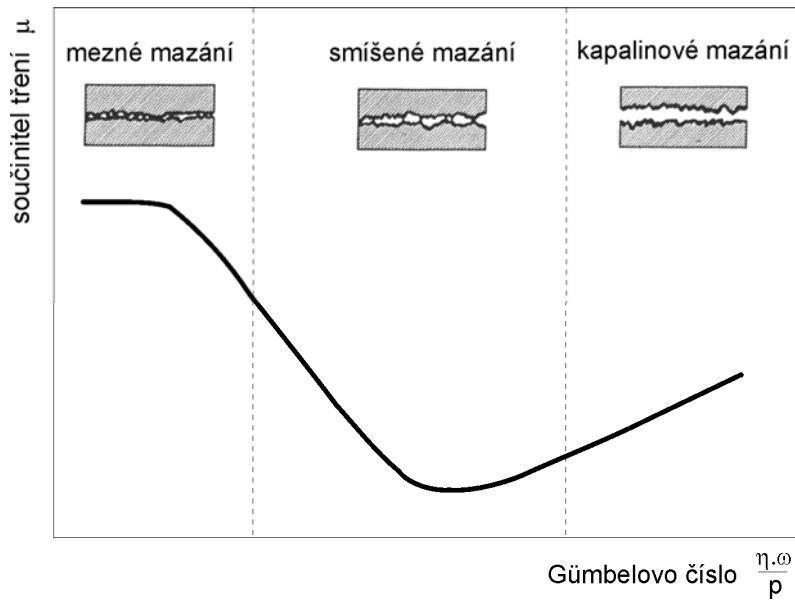
kde  $\alpha$  je **viskozitně tlakový koeficient**. Jeho hodnota se většiny kapalných maziv pohybuje mezi 5 až 35 GPa<sup>-1</sup>.

Fluid	Temperature, $t_m$ , °C		
	38	99	149
	Pressure-viscosity coefficient, $\xi$ , m <sup>2</sup> /N		
Advanced ester	$1.28 \times 10^8$	$0.98 \times 10^8$	$0.851 \times 10^8$
Formulated advanced ester	$1.37 \times 10^8$	$1.00 \times 10^8$	$0.874 \times 10^8$
Polyalkyl aromatic	$1.58 \times 10^8$	$1.25 \times 10^8$	$1.01 \times 10^8$
Synthetic paraffinic oil (lot 3)	$1.77 \times 10^8$	$1.51 \times 10^8$	$1.09 \times 10^8$
Synthetic paraffinic oil (lot 4)	$1.99 \times 10^8$	$1.51 \times 10^8$	$1.29 \times 10^8$
Synthetic paraffinic oil (lot 2) plus antiwear additive	$1.81 \times 10^8$	$1.37 \times 10^8$	$1.13 \times 10^8$
Synthetic paraffinic oil (lot 4) plus antiwear additive	$1.96 \times 10^8$	$1.55 \times 10^8$	$1.25 \times 10^8$
C-ether	$1.80 \times 10^8$	$0.980 \times 10^8$	$0.795 \times 10^8$
Superrefined naphthenic mineral oil	$2.51 \times 10^8$	$1.54 \times 10^8$	$1.27 \times 10^8$
Synthetic hydrocarbon (traction fluid)	$3.12 \times 10^8$	$1.71 \times 10^8$	$0.939 \times 10^8$
Fluorinated polyether	$4.17 \times 10^8$	$3.24 \times 10^8$	$3.02 \times 10^8$

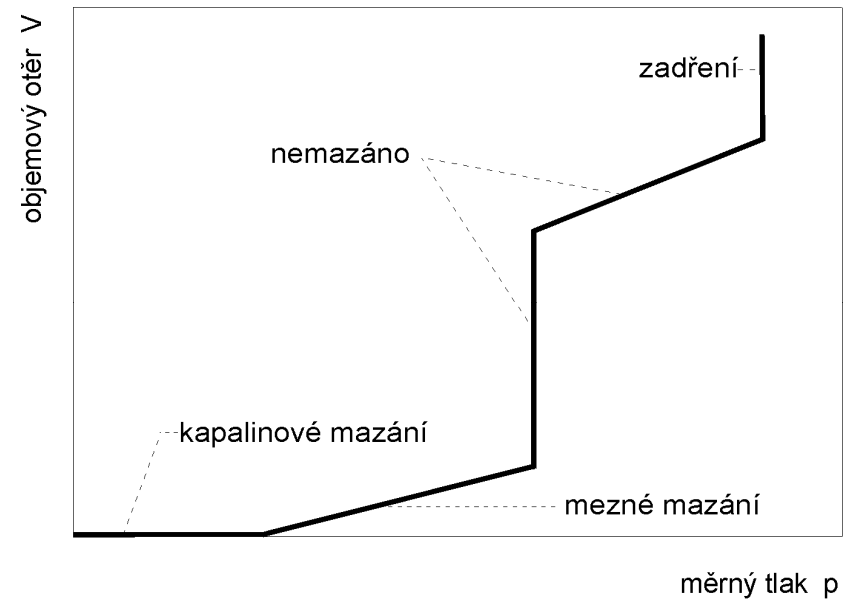
# Režimy mazání

Rozlišují se režimy mazání, při kterých dochází k oddělení třecích povrchů koherentním mazacím filmem (mazání **hydrostatické**, **hydrodynamické**, **elastohydrodynamické** a mazání **vytlačovaným filmem**) a režimy, při kterých dochází k bezprostřední interakci mezi třecími povrchy (mazání **mezné** a mazání tuhými mazivy).

## Stribeckova křivka

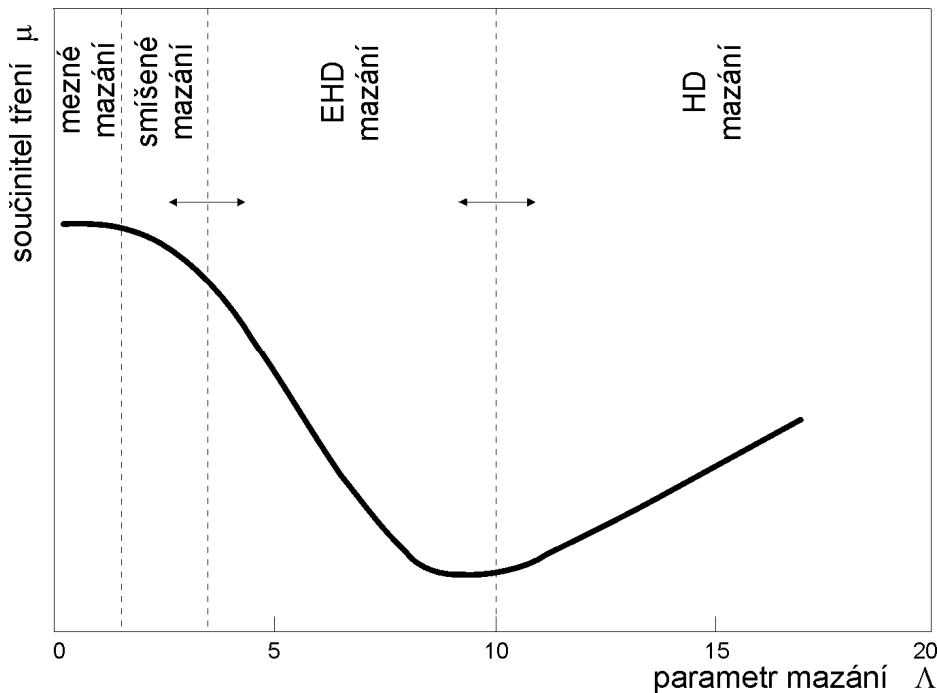


## Závislost objemového otěru na tlaku



# Parametr mazání

Zkoušky valivých ložisek a ozubení prokázaly, že životnost třecích povrchů nezávisí na samotné tloušťce mazacího filmu, ale na jejím poměru k redukované drsnosti třecích povrchů. Tuto skutečnost vyjadřuje **parametr mazání  $\Lambda$** .



$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{Rq_a^2 + Rq_b^2}}$$

$h_{\min}$  minimální tloušťka filmu

$Rq_a$  pr. kvadr. úchylka profilu tělesa  $a$

$Rq_b$  pr. kvadr. úchylka profilu tělesa  $b$

$5 \leq \Lambda < 100$  hydrodynamické

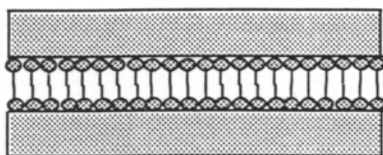
$3 \leq \Lambda < 10$  elastohydrodynamické

$1 \leq \Lambda < 5$  smíšené

$\Lambda < 1$  mezní

# Mezné mazání

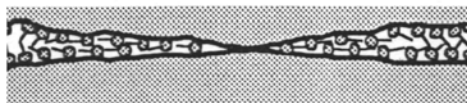
Mezné mazání je režim mazání, při kterém se povrchy nacházejí v bezprostřední blízkosti, takže dochází k vzájemné interakci mezi jejich povrchovými nerovnostmi. Zatížení není přenášeno hydrodynamickým působením mazacího filmu, ale prostřednictvím velmi tenkého **mezného filmu**, jehož struktura a vlastnosti jsou odlišné od struktury a vlastností maziva a povrchů. Tento film vzniká fyzikální adsorpcí, chemisorpcí nebo chemickými reakcemi maziva s třecími povrchy.



W. B. Hardy



F. P. Bowden - D. Tabor

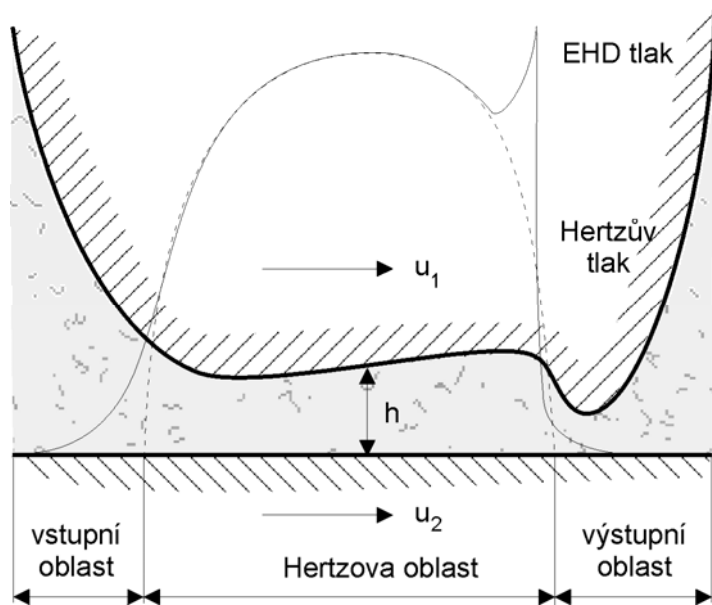


A. W. Adamson

Podstata mezného mazání spočívá ve vytváření ochranného povrchového filmu sestávajícího z dlouhých řetězců polárních molekul, které jsou orientovány kolmo k povrchu a jsou k němu připoutány svými polárními konci. Většina rafinovaných ropných olejů jsou sice nepolární nebo málo polární látky, avšak obsahují složky polárního charakteru, které adsorbují na běžně užívaných kovových třecích površích.

# Elastohydrodynamické mazání

Elastohydrodynamické mazání (EHD, EHL) je režim kapalinového mazání, při kterém elastické deformace povrchů jsou řádově stejně velké jako tloušťka hydrodynamického mazacího filmu, jehož chování ovlivňují. K elastohydrodynamickému mazání obvykle dochází mezi zatíženými, nekonformně zakřivenými povrchy nacházejícími se v relativním pohybu.

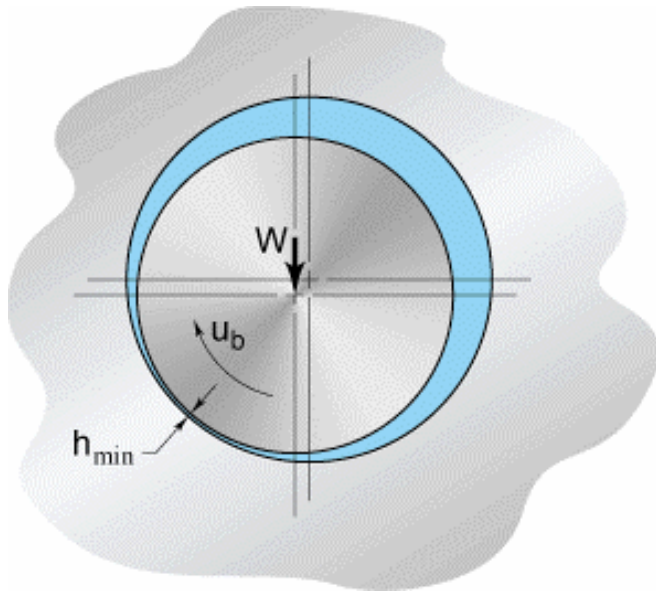


## Základní znaky EHD kontaktu

1. V centrální (Hertzově) oblasti kontaktu je tenký, přibližně paralelní mazací film, pro jehož tloušťku platí  $h \approx u^{0,68}$ .
2. Rozložení tlaku v mazacím filmu odpovídá přibližně Hertzovu rozložení.
3. V oblasti náhlého snížení tloušťky mazacího filmu se nachází lokální, druhé tlakové maximum.

# Hydrodynamické mazání

Hydrodynamické mazání (HD) je režim kapalinového mazání, při kterém se vytváří mezi povrchy souvislá vrstva maziva, která zcela zabraňuje styku povrchových nerovností a svým tlakem „ruší“ účinek kolmého zatížení na povrchy těles. K hydrodynamickému mazání dochází mezi konformně zakřivenými povrchy nacházejícími se v relativním pohybu.



## Charakteristické znaky HD mazání

1. Tloušťka mazacího filmu je funkcí normálového zatížení  $W$ , rychlosti  $u$ , viskozity  $\eta$  a geometrie ložiska. Pro minimální tloušťku platí  $h_{min} \approx (u/W)^{0,5}$ .
2. Povrchy nevykazují téměř žádné opotřebení.
3. Velikost součinitele tření závisí především na viskozitě maziva.